

TRONCS FOSSILES MORAINIQUES ET CLIMAT DE LA PERIODE HOLOCENE EN EUROPE ¹

par Albert Bezingé ²

I. INTRODUCTION

Le climat n'a pas toujours été tel qu'il est. A ce sujet, il a paru ces dernières années les livres de CALDER (La machine climatique, film d'anticipation sur le retour d'une période glaciaire sur le globe), de KAHN et WIENNER (Vous vivrez cela ! Livre qui décrit le déchaînement de la nature) et de KAISER (1975) (Le retour des glaciers. Livre au titre évocateur). Les causes des variations climatiques ne sont pas connues. Il existe beaucoup d'hypothèses, mais aucune n'a pu être démontrée. Il est certain qu'à notre époque de satellites, on débouchera tôt ou tard sur une meilleure connaissance de ces phénomènes qui influencent directement notre existence.

Ce que l'on sait, c'est que le climat a varié au cours des millénaires et qu'il modifie la répartition de l'eau, sous forme liquide (mers), et solide (glaces), des végétaux, du peuplement humain, des espèces animales.

Pour tenter de connaître le climat futur et les influences de l'homme sur celui-ci, il est très important de connaître le passé climatique le plus exactement possible. Les méthodes modernes de datations par isotopes ont permis de faire un grand pas en avant dans ce domaine.

Ainsi, sous l'influence du climat, les paramètres définis auparavant ont fluctué au cours des millénaires et la connaissance de ces fluctuations a permis de préciser les variations climatiques de l'Holocène sur 10 000 ans AP ³. Le mécanisme de réponse des différents paramètres n'est pas

¹ Travail présenté à la Société Hydrotechnique de France en 1974

² Grande-Dixence SA, 41, rue des Creusets, 1950 Sion.

³ AP = avant le Présent (= BP, before Present).

bien connu, mais cela n'empêche pas une comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes.

Dans les Alpes, on a retrouvé de nombreux troncs morainiques ou arbres fossiles parfaitement conservés, qui datés au C_{14} ⁴, ont donné des âges extraordinaires de 9400 AP, c'est-à-dire qu'ils sont morts, en général par accident climatique, il y a fort longtemps. En analysant les sites et l'altitude, on est arrivé à mettre sur pied une nouvelle méthode qui définit de façon précise (sans tenir compte des corrections à apporter aux datations C_{14} , voir figure 2), les dates et le nombre des variations des époques chaudes et froides. Cette méthode, comparée à d'autres, lorsqu'il y a concordance des résultats, permet de mieux préciser et définir le climat de l'Holocène.

Notre étude de base comporte la comparaison de quatre méthodes différentes de recherche du climat, déterminées par datations C_{14} , dont trois sont faites sur des échantillons européens et la quatrième sur un échantillon provenant du Cap Vert. La cinquième méthode, datée par les lois théoriques d'écoulement des glaces, donne les températures trouvées dans les glaces du Groenland par l'analyse de l' O_{18} ⁵, tant il est vrai qu'à long terme, le climat de l'Europe est lié à celui du Groenland.

Toutes les méthodes donnent des valeurs relatives, soit sur les températures, soit sur les durées ou sur les dates des changements climatiques.

Ceci provient essentiellement de la validité des échantillons et des influences parasites, du temps de réponse des échantillons ou du milieu analysé, des techniques de datations difficiles, des variations des C_{14} et O_{18} au cours des siècles.

Ce n'est que par de multiples comparaisons que l'on peut assurer et définir correctement une époque climatique en ayant obtenu un grand nombre de résultats concordants. En fin d'étude (voir fig. 1 et tableau I), il est surprenant de constater:

- Les nombreux résultats concordants, environ 80 %, qui s'établissent entre les différentes méthodes (coïncidence des dates).
- Le nombre élevé des variations climatiques assurées et probables, soit 13 sur 9500 ans.
- L'ampleur de certaines d'entre elles, puisque les glaciers sont descendus jusqu'à 1050 m d'altitude dans la région de Grindenwald.

⁴ Radio-isotope Carbone 14.

⁵ Radio-isotope Oxygène 18.

RECHERCHE DU CLIMAT POSTGLACIAIRE SUR LES ALPES

PAR A. BEZINGE SION LE 18 avril 75

a CHRONOLOGIE DES PERIODES FROIDES INTERNE PAR SÉLECTION DE TROUS MONITRÉS SIGNIFICATIFS, TROUS EXTÉRIEUX, DANS LES MORAINES DES ALPES ET DATES AU C 14
PAR CONCENTRATION DES DATES SUR CERTAINES PERIODES, CELLES - CI INDIQUENT A COUP SUR UN CHANGEMENT DE CLIMAT
METHODE DÉCRITE PAR BEZINGE A LA REUNION DE LA SECTION GLACIOLOGIQUE DE LA SHF, PARIS, MAI 1974 (DATES ET DÉCOUVERTES DES TROUS)
INCERTITUDES : CAUSES DE MORT DES ARBRES, PRÉCISION DES DATES DU C 14 MOINS 3000 ANS AP

TRONCS SIGNIFICATIFS
TRONCS NON SIGNIFICATIFS
A
INTERVALLE DE 10 S DE PRÉCIPITATION
POUR 100 ANS
POUR 100 ANS

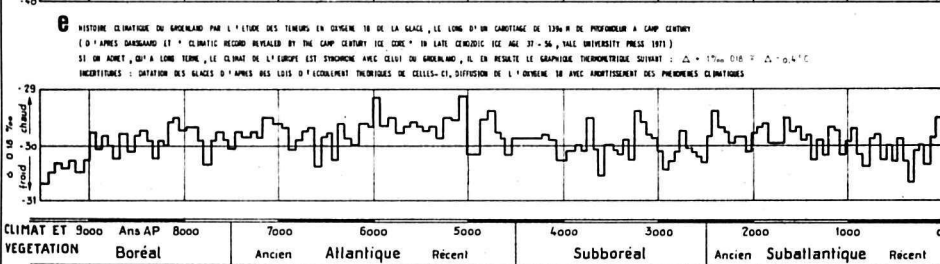
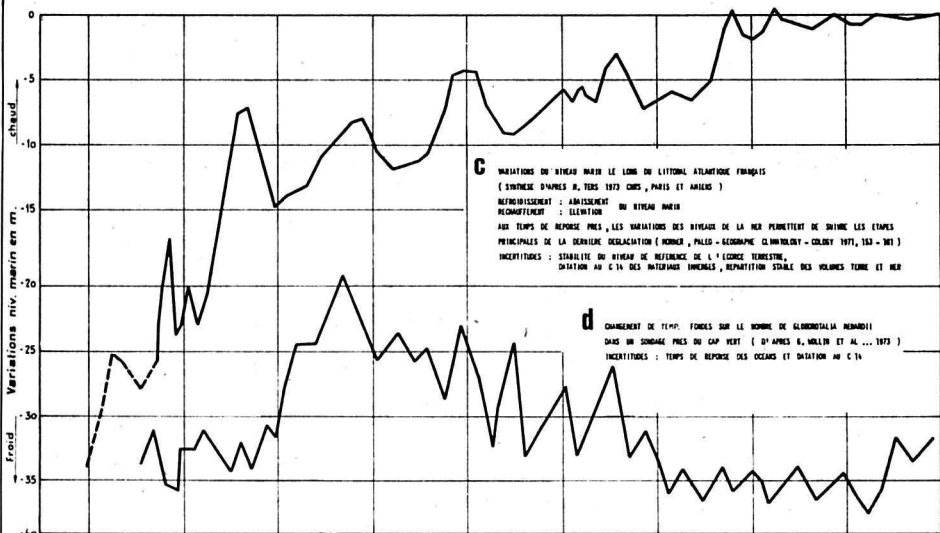
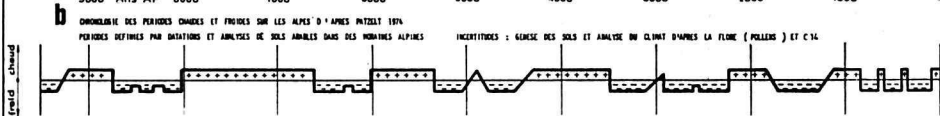
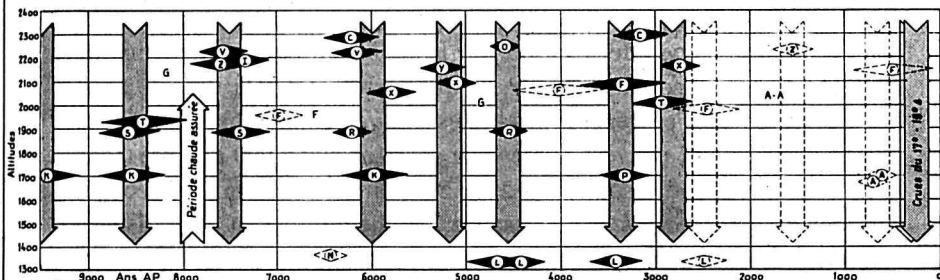


Fig. 1. Climat postglaciaire. Courbes a, b, c et d (explications dans le texte).

II. TRONCS MORAINIQUES

Depuis vingt-cinq ans, par suite de travaux divers exécutés dans les Alpes, en haute montagne, on a retrouvé des troncs d'arbres parfaitement conservés (parfum, résine), à l'intérieur de moraines. Le développement de la méthode de datation par le radioisotope C_{14} a permis de trouver des âges jusqu'à 9400 AP, ce qui correspond à la date de mort des arbres. Ce sont en général des aroles (*Pinus Cembra*) ou des mélèzes (*Larix decidua*) qui peuvent avoir vécu pendant 400 à 500 ans. Le tronc le plus âgé retrouvé jusqu'ici (à 2300 m d'altitude) est un mélèze qui comprenait 1100 cernes de croissance; malheureusement il a disparu vers 1930 (tableau II et III, fig. 1a et 2).

Trois observations nous ont servi de base pour mettre au point cette nouvelle méthode d'analyse du climat.

- En général, les troncs ont été trouvés à une altitude plus élevée que la limite actuelle des forêts.
- Dans la moraine de fond du glacier de Z'Mutt, à 2200 m d'altitude, à 8 m de profondeur, on a retrouvé plusieurs arbres couchés vers l'aval, dont un comprenait 315 cernes: tronc Z 7590 AP. Les 15 derniers cernes étaient très serrés, témoins d'étés froids, de faible croissance; le glacier en crue finit par arracher la forêt.
- Des températures estivales élevées influencent les reculs et les décrues des glaciers, la croissance rapide des arbres en haute altitude (mélèzes et aroles) qui colonisent les zones délaissées par le recul des glaciers (cernes larges).

De là, nous avons été amenés aux conclusions suivantes.

- Il y a eu des périodes plus favorables à la croissance des arbres que lors des siècles derniers et ce, pendant plusieurs siècles.
- Avec une grande probabilité, ces arbres sont morts à la suite des avances glaciaires qui les ont recouverts de matériaux morainiques.
- Croissant en périodes chaudes et mourant par retour du froid, ces arbres nous fournissent des indications précieuses.
- Parmi les centaines de datations faites sur les Alpes, on sélectionne les troncs significatifs, c'est-à-dire ceux trouvés dans les moraines de fond ou latérales. En portant ces datations sur un graphique (fig. 1, courbe a), on obtient des résultats situés à différentes époques.
- Si on a au moins deux dates qui coïncident approximativement, on est sûr de définir un changement du climat.
- Ceci permet de trouver avec certitude les époques des changements de chaud à froid, soit une chronologie du climat.

— Les troncs de surface, trouvés aux portails glaciaires ou sur des moraines, sont peu significatifs. Ils sont portés tout de même en graphique et peuvent contribuer à trouver une période probable de crue.

TABLEAU I

	Ages C ₁₄	Ages calendrier (correctifs SUESS)
1. Grandes crues généralisées assurées du 19e siècle	150 AP	= AP
2. Grandes crues généralisées assurées du 17e siècle	350	=
3. Faibles crues probables	750- 800	=
4. Faibles crues probables	1500-1600	=
5. Crues moyennes probables	vers 2500	2600 AP
6. Crues moyennes assurées	2750-2900	2900 AP
7. Fortes crues généralisées assurées	vers 3400	3600 AP
8. Fortes crues généralisées assurées	vers 4600	5300 AP
9. Faibles crues assurées	vers 5200	5900-6200 AP
10. Grandes crues généralisées assurées	5900-6200	6600-6900 AP
11. Crues moyennes généralisées assurées	7400-7600	~ 8200-8400 AP
12. Grandes crues généralisées assurées	8400-8500	~ 9200-9300 AP
13. Grandes crues probables	vers 9400	~ 10200 AP

Inventaire des époques assurées et probables de crues glaciaires par les troncs morainiques sélectionnés sur l'ensemble des Alpes datés au C₁₄.

On sait que les concentrations de C₁₄ dans l'atmosphère ont toujours varié au cours des millénaires, faussant les datations C₁₄.

Une courbe continue dendrochronologique faite par SUESS sur les pins d'Arizona et sur 7000 ans, a permis d'étalonner les datations C₁₄, ce qui donne la possibilité de corriger ces dates pour obtenir des dates calendrier, ou dates réelles des phénomènes (fig. 2).

Relevons les faits importants qui étayent notre théorie.

- Les glaciers des Alpes fluctuent de façon complexe, surtout en fonction de deux paramètres météorologiques importants: précipitations annuelles et températures d'été. Qui dit crue glaciaire sous-entend précipitations en augmentation ou températures en baisse, ou encore l'un et l'autre, soit un changement de climat.
- Le temps de réponse des glaciers aux variations actuelles du climat (refroidissement) est estimé à 4-5 ans pour les petits glaciers

(Mischabel) et à 20-30 ans, pour les grands glaciers (Aletsch, Gorner). Par contre, il semble que lors d'un réchauffement, le recul glaciaire est plus lent que le phénomène de crue: influence des gradients climatiques.

TABLEAU II

INVENTAIRE GENERAL DES TRONCS MORAINIQUES ET SIGNIFICATIFS UTILISES

Caractéristiques des troncs morainiques trouvés par Grande Dixence S.A., Sion, F. Rothlisberger, géographe, Zurich, R. Vivian, géographe, Grenoble et datés par le laboratoire radiocarbène, Lyon, M. EVIN.

T18400 AP² \pm 200³, Lyon, n° 7494, Evolène, 1930 m, Mélèze⁵

Trouvé à Arolla-Tsidjiore, dans une vieille moraine latérale, sous 8-10 m de profondeur. Parfaitement conservé, l'arbre était couché vers l'aval; seul un éclat de bois a été prélevé. La limite actuelle de la forêt est située au-dessus du site. C'est un tronc très significatif et il s'agit d'un des premiers arbres qui ont crû après le Wurm dans cette région.

G 8160 AP \pm 220, Lyon, n° 298, Zermatt, 2050 m, ?

Tronc en bois noir trouvé au portail du glacier du Gorner, après une crue; essence inconnue, bien conservé. Il existe, au-dessus de cette altitude, quelques aroles centenaires en adret et quelques jeunes mélèzes en ubac. Ce tronc n'est pas très significatif.

Z 7590 AP \pm 180, Lyon, n° 681, Zermatt, 2180 m, Mélèze

Rondelle de 315 cerne coupée sur l'arbre trouvé en 1959, couché par 8 m de profondeur dans la moraine de fond du glacier de Z'Mutt, parfaitement conservé. Les 300 cerne initiaux sont normaux, tandis que les 15 derniers sont très fins (période froide). D'après un témoin, il s'agissait de plusieurs troncs couchés vers l'aval avec une inclinaison de 10-20 %. Dans la coupe du terrain, il existe deux strates de terre végétale qui pourraient indiquer grossièrement trois périodes chaudes, depuis l'écrasement de la forêt. Tronc très significatif.

G 7360 AP \pm 180, Lyon, n° 297, Zermatt, 2000 m, ?

Petit tronc provenant de la même région que G 8160, mais d'essence différente et n'ayant pas une grande signification.

¹ Lettre de repérage pour la figure 1a.

² Datation de la mort des arbres en années AP (Avant le Présent = BP Before Present).

³ Avec intervalles de 95 % de probabilité en année.

⁴ Centre de datation et numéro d'échantillon.

⁵ Espèce végétale.

F 6950 AP \pm 150, Lyon, n° 299, Evolène, 1500-1950 m, Mélèze

Tronc de 1 m de diamètre, trouvé aux Haudères, après la débâcle glaciaire de Ferpècle en 1952. Il a été daté 6610 ans vers 1960, puis on a trouvé 6950 ans, après une deuxième datation en 1972. Sa provenance est inconnue du fait des forêts qui bordent la rivière, mais on pense qu'il peut provenir du glacier, était parfaitement conservé et érodé localement par l'eau glaciaire. Actuellement, ce tronc est pourri à 80 % et seule l'enveloppe permet de voir les cernes de croissance.

Tronc de signification incertaine.

G 4840 AP \pm 150, Lyon, n° 613, Zermatt, 2000 m, ?

Petit tronc trouvé au portail du Gorner, genre genévrier, n'ayant pas une grande signification.

F 3360 AP \pm 230, Lyon, n° 685, Evolène, 2075 m, Arole

Tronc trouvé dans la moraine médiane des glaciers de Ferpècle et de Mt Miné.

Tronc très significatif.

T 2940 AP \pm 150, Lyon, n° 750, Evolène, 2000 m, Mélèze

Trouvé sous la moraine de fond du glacier de Tsidjiore, Arolla, avec racines et tronc.

Tronc très significatif.

F 2450 AP \pm 200, Lyon, n° 611, Evolène, 1975 m, Epicéa

Tronc d'épicéa (espèce rare), trouvé dans l'ancien lit du torrent glaciaire de Ferpècle.

Tronc peu significatif.

G 1000 AP \pm 110, Lyon, n° 686, Zermatt, 1900 m, Charbon de bois

Strates de charbon de bois qui recouvraient des déchets de pierres olaires provenant d'une fabrique d'ustensiles de ménage: pots, etc., trouvées dans une fouille à Furri. Ainsi, on peut déduire que cette fabrique existait il y a plus de 1000 ans.

F 520 AP \pm 200, Lyon, n° 612, Evolène, 2140 m, Arole

Tronc trouvé en surface entre la moraine du 19e siècle et le chemin d'accès à la cabane de Bricola, au-dessus de la forêt actuelle.

Tronc peu significatif.

Z 1550 AP \pm 100, Lyon, n° 682, Zermatt, 2220 m, Mélèze

Tronc de 0.20 m de diamètre, trouvé en automne 1971 au portail du glacier de Z'Mutt, parfaitement conservé. Il a dû croître probablement à une époque plus chaude, car actuellement en amont il n'y a plus de forêt. Sur 185 cernes, les 65 derniers sont très serrés, ce qui indique un refroidissement sur la fin de sa vie. Il a dû être arraché par le glacier en crue.

Tronc peu significatif parce que trouvé en surface.

- Lors d'un réchauffement, la limite des forêts suit le recul des glaciers avec 20 ou 30 ans de retard (glacier de Z'Mutt à 2200 m).
- Les altitudes et les sites où l'on retrouve les troncs peuvent permettre de connaître l'amplitude des avances glaciaires, d'après la morphologie et les dimensions des glaciers en cause.
- La limite actuelle des forêts est de 200 à 300 m plus basse que pendant le Moyen Age.

Remarques (fig. 1, courbe a)

- En général, dans les Alpes, les dates de mort des troncs significatifs concordent et sont localisées sur certaines périodes, que ce soit en France, en Autriche, en Italie ou en Suisse.
- De 9500 à 2800 AP, on peut assurer qu'il y a eu au moins sept avances ou épisodes glaciaires en Europe et une période probable de crue, vers 9400.
- De 2800 AP à 0, il y a eu deux périodes de crues assurées aux XVII^e et XIX^e siècle et trois périodes probables de crues, confirmées par des dates récentes (RÖTHLISBERGER comm. pers.).
- De 9500 AP à nos jours, il y a sûrement eu neuf périodes de crues et quatre autres probables.
- Le tronc Z 7590 AP, mélèze intact, comprend 315 cernes et permet de dire qu'il y a eu une période chaude entre 7900 et 7600 AP à 2180 m d'altitude.
- Deux périodes chaudes de longue durée sont encore mal connues par manque de troncs, soit de 7400 à 6200 et de 4400 à 3500 AP.
- Entre 6200 et 5800, il y a peut-être eu deux périodes de crues (influence de l'intervalle de 95 % de probabilité des dates C₁₄ et qui permet des combinaisons différentes).

TABLEAU III

SELECTION DES TRONCS MORAINIQUES SIGNIFICATIFS RETROUVES DANS LES ALPES¹

X 5760 AP \pm 120, Berne, n° 514, Saas-Almagell, 2044 m, Mélèze
 Trouvé dans la large moraine du glacier de l'Allalin, lors des travaux hydro-
 électriques de Mattmark, bien au-dessus de la limite actuelle de la forêt.
 Tronc très significatif.

¹ Tiré de la revue Radio Carbon.

Y 5250 AP \pm 110, Vri., n° 106, 2150 m,

Tronc trouvé au Val Veni, versant est du Mont Blanc, sous 1.40 m de matériaux (sédiments), au-dessus de la limite actuelle des forêts.

Tronc très significatif.

X 5100 AP \pm 100, Berne, n° 833, Saas-Almagell, 3091 m, ?

Tronc trouvé à Mattmark dans la moraine sud de l'Allalin, à 35 m de profondeur; site situé au-dessus de la limite des forêts.

Tronc très significatif.

O 4600 AP \pm 80, Berne, n° 254, Guttanen, 2240 m, Arole

Tronc trouvé sous la moraine du glacier de l'Oberaar, lors de travaux hydro-électriques. Tronc significatif, car actuellement, il n'y a pas de forêt dans la région (Alpes Bernoises).

F 4030 AP \pm 250, Sa., n° 229, Evolène, 1950 m, Arole

Tronc trouvé à la jonction des glaciers de Ferpècle et Mt Miné, en 1962.

Tronc assez significatif.

X 2760 AP \pm 100, Berne, n° 834, Saas-Almagell, 2160 m, ?

X 2750

Troncs trouvés dans la moraine nord du glacier de l'Allalin.

Troncs très significatifs.

A 1860 AP \pm 100, Berne, n° 662, Ried-Mörel, 2060 m, Mélèzes

A 1760

Troncs trouvés à 2060 m sur la moraine droite du glacier d'Aletsch. Transport par avalanches probable.

Troncs de signification mitigée.

S 8530 AP \pm 150, Berne, n° 473a, Alp Frisal, GR, 1879 m, Arole, 1962

Trouvé par forage, sous 23.8 m de profondeur, sur rive gauche d'un ancien lit glaciaire.

S 7380 AP \pm 150, Berne, n° 473b, Alp Frisal, GR, 1879 m, Arole, 1962

Trouvé entre 34 et 35 m de profondeur, comme ci-dessus.

P 3340 AP \pm 120, Berne, n° 382, Göschenernalp, Uri, Mélèze, 1960

Trouvé à 10 m de profondeur, lors des travaux d'excavation d'un barrage, dans une vieille moraine latérale.

R 6200 AP \pm 100, Berne, n° 675a, Val Bavona, TI, 1880 m, Mélèze, 1964

Trouvé dans une vieille moraine de fond à Robiei, lors de travaux d'excavation.

R 4520 AP \pm 100, Berne, n° 675 b, Val Bavona, TI, 1880 m, Arole

Trouvé comme le mélèze R 6200.

L 2500 AP \pm 120, Berne, n° 137, Grindelwald, BE, 1050 m, ?, 1958

L 2500 AP \pm 120, Berne, n° 137, 1050 m, 1958

L 4700 AP \pm 160, Berne, n° 138, 1050 m, 1958

L 4400 AP \pm 120, Berne, n° 139, 1050 m, 1958

L 4400 AP \pm 120, Berne, n° 140, 1050 m, 1958

L 3400 AP \pm 120, Berne, n° 141, 1050 m, 1958

Bois trouvés dans d'anciennes moraines du Grindelwaldgletscher.

C 6220 AP \pm 110, Vri., n° 8, Fernaufener, Tirol, 2290 m, Arole, 1962
Arole trouvé à 4.2 m de profondeur dans un ancien lit glaciaire.

C 3150 AP \pm 120, Vri., n° 9, Fernaufener, Tirol, 2290 m, ?, 1962
Bois inconnu trouvé à 2.90 m de profondeur dans une ancienne moraine.

K 9390 AP \pm 160, Vri., n° 32, Kaunertal, Tirol, 1700 m, ?, 1965
Pièce de bois déposée dans du sable à 35.8 m de profondeur: forage TWK dans un ancien lit glaciaire.

K 5990 AP \pm 140, Vri., n° 33, Kaunertal, Tirol, 1700 m, ?, 1965
Pièce de bois trouvée à 6.50 m de profondeur par forage dans un ancien lit glaciaire.

K 8520 AP \pm 160, Vri., n° 34, Kaunertal, Tirol, 1700 m, ?, 1965
Bois avec taches noires trouvé par forage.

I 7350 AP \pm 130, Vri., n° 50, Tirol, Italie, 2225 m, ?, 1965
Branche d'arbre dans sable et tourbe, sous 2.50 m de matériaux à 30 m de la moraine frontale du Grunerfernergletscher.

T 6400 AP \pm 100, Vri., n° 107, Argentières-F, 1363 m, ?, 1969
Bois trouvé à 12 m de profondeur dans matériaux morainiques de l'ancien lit du glacier d'Argentières.

A 720 AP \pm 100, Berne, ?, Ried-Mörel, 1700 m, ?, 1956

A 800

Bois et racines en surface du glacier d'Aletsch.

Incertitudes

- Mort des arbres due aux avances glaciaires (autres causes: avalanches, débâcles).
- Il est possible que certains troncs pris comme significatifs ne le soient pas. Par contre, d'autres troncs de date isolée et fixés comme non significatifs parce que trouvés en surface, peuvent se révéler comme significatifs d'où la définition de crues probables à ces époques.
- Zone de prélèvements de l'échantillon sur l'arbre.

- L'imprécision des datations au C_{14} et les correctifs à y apporter par suite des variations de concentration C_{14} au cours des siècles (voir fig. 2 et tableau I).

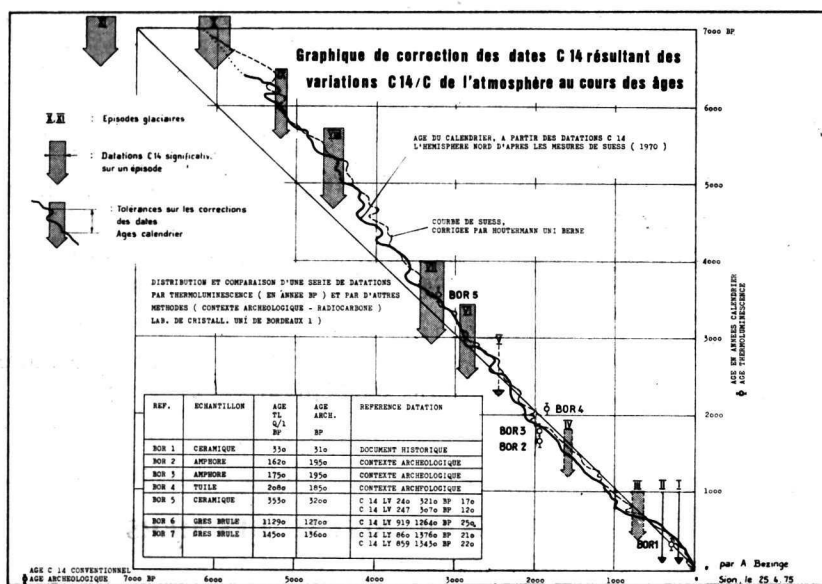


Fig. 2. Correction des dates C_{14} d'après SUESS (1969) et HOUTERMANN.

III. GEOMORPHOLOGIE ET PALYNOLOGIE

PATZELT et BORTENSCHLAGER (1973), ont mis au point une méthode chronologique astucieuse. L'analyse des strates de terre végétal que l'on retrouve prises en «sandwich» à l'intérieur de moraines superposées, a permis par 42 datations au C_{14} et recherches palynologiques dans des marais alpins, de déterminer les changements de climat chaud à froid (fig. 1b).

Remarques

- Les deux méthodes concordent bien et la comparaison des résultats a) et b) montre qu'il y a douze dates de changement de chaud à froid qui sont en corrélation.

- La longue période chaude, trouvée par Patzelt 8000-6600 AP, ne correspond pas avec la courbe a), puisque quatre troncs assurent une période froide vers 7500 AP.
- De 6600 à 6300, PATZELT indique une période froide que nous ne pouvons assurer du fait de deux troncs peu significatifs, courbe a).

Incertitudes

- La genèse des sols analysés: résulte-t-elle bien d'un changement climatique ?
- Lors de variations climatiques, influence du temps de migration des végétaux ou transports par le vent des pollens.
- L'imprécision des datations C_{14} et correctifs.
- Comme les deux méthodes sont datées au C_{14} , on peut sans autre les comparer (erreurs et correctifs semblables).

IV. VARIATIONS DU NIVEAU DES MERS

Les variations du niveau des mers nous fournissent des informations sur les variations climatiques importantes à long terme (fig. 1c).

En effet, chaque fois qu'il se produit un refroidissement du globe, cela produit un abaissement du niveau des mers, à la suite de la transformation de l'eau en glace sur les calottes Arctiques et Antarctiques. Celles-ci renferment le 99 % du volume d'eau douce du globe.

On sait que vers la fin de la période glaciaire du Wurm, le niveau des mers était environ 100 m plus bas qu'aujourd'hui. De nombreux chercheurs ont établi des courbes de ces variations: FAIRBRIDGE (1961) sur des littoraux stables du monde et MORNER (1969) en Scandinavie.

Pour l'Europe, une équipe du CNRS, dont Madame TERS, ont établi en 1973 une nouvelle courbe des niveaux marins d'après 160 datations au C_{14} de végétaux trouvés par forages sur le littoral atlantique français.

Ce secteur étudié est particulièrement stable, sans phénomène apparent d'isostasie.

Remarques

- Relevons que par suite de l'inertie volumétrique et thermique des océans ainsi que des calottes polaires, les phénomènes climatiques apparaissent amortis et retardés dans le temps.
- Les résultats concordent approximativement entre les courbes a) et c), soit sept changements de climat sur dix.
- Les deux discordances situées vers 4600 AP et 2800 AP peuvent provenir de la manière de déterminer les oscillations de la courbe des datations à niveau minimum. Le lissage de la courbe peut éliminer certaines variations réelles des niveaux.
- En comparant b) et c), on relève seulement six périodes qui concordent et six périodes en discordance.
- Pour la recherche du climat holocène, la méthode a l'avantage de nous faire connaître les changements de climat (retardés), les durées et les amplitudes (amorties) et les tendances passées.

Incertitudes assez importantes

- Les temps de réponse.
- Les variations parasites du volume d'eau: dilatation des eaux par effet thermique et changement de la répartition des volumes terres et mers.
- Influence du marnage local de 2 à 15 m sur les végétaux.
- Les datations au C_{14} et les correctifs, donc résultats comparables à a), b) et c).
- La courbe de FAIRBRIDGE est bien en corrélation pour les périodes de niveau minimal et maximal mais la tendance générale des niveaux diverge avec celle trouvée par TERS.
- Cette méthode n'est pas assez précise. Elle offre l'avantage d'indiquer des tendances et intègre les changements climatiques sur l'ensemble du globe.

V. PALEOTEMPERATURES

Les foraminifères sont des petits animacules marins qui ne tolèrent pas de grands écarts de température. Ainsi, par analyse de sédiments marins et de fossiles de *Globorotalia ménardi*, on peut retrouver les variations de la température des mers proche de la surface (fig. 1d).

Une équipe du CNRS de Gif-sur-Yvette (WOLLIN et al, 1973) a étudié un site au Cap Vert et a déterminé une échelle relative de variation des températures de l'eau de mer. Les résultats sont donnés par la courbe d, de la figure 1.

Remarques

- Proche de la surface de la mer, le nombre d'oscillations des températures est très élevé.
- Malgré la haute fréquence des cycles, il y en a peu qui coïncident avec les autres méthodes. En comparant les courbes a et d (fig. 1), quatre cycles concordent et cinq sont discordants.
- Entre 6500 et 2200 AP, il y a contradiction dans l'allure des tendances (courbes c et d). WOLLIN et al. indiquent un refroidissement de 6400 à 2000, tandis que TERS a trouvé un réchauffement.

Incertitudes importantes

- L'inertie thermique des océans.
- L'influence des courants marins sur les températures de l'eau et sur le peuplement du *Globorotalia*.
- Les concentrations O_{18}/O_{16} pour déterminer les températures.
- Les datations C_{14} et correctif C_{14} .
- Climat très spécifique de ces latitudes.
- Il nous semble que cette méthode ne donne pas une bonne image du climat du globe, malgré les fines analyses exécutées.

VI. GLACES DU GROENLAND ET OXYGENE 18

Des glaciologues américains et danois ont exécuté un forage profond de 1390 m sur la calotte du Groenland et l'analyse fine de l'isotope O_{18} contenu sous forme de traces, a permis de remonter jusqu'à 120 000 ans dans l'histoire du climat. En effet, la concentration d' O_{18} , contenue dans des molécules H_2O_{18} est d'autant plus forte que les températures auxquelles elles se forment sont plus basses. Il existe une relation presque linéaire entre les teneurs isotopiques O_{18} de la neige et les températures moyennes annuelles de la zone étudiée. Pour $\Delta 1^{\circ}/_{00} O_{18} \cong \Delta 0,4^{\circ} C$ (fig. 1c).

L'échelle du temps est donnée par des calculs faits d'après les lois théoriques d'écoulement des glaces. 1000 AP correspond à une profondeur de 350 m et 9000 AP à 1120 m.

La courbe (fig. 1e) indique avec beaucoup de détails, les variations de température du Groenland avec les amplitudes, les durées et les tendances.

Remarques

- Pour comparer les résultats a) (dates C_{14}) base de l'étude, avec les résultats e) (dates O_{18}), il faut corriger les dates C_{14} (âges relatifs) avec des correctifs, pour obtenir des âges réels ou calendriers. Ceci provient que sa concentration varie constamment au cours des âges. La meilleure méthode actuelle est celle de SUESS (1969), qui par l'établissement d'une courbe dendrochronologique continue sur des pins d'Arizona, a permis d'étalonner les datations C_{14} . Cette courbe a été remaniée par HOUTERMANN (1974) et elle est dessinée sur la figure 2, avec des recoupements de datations faites par thermoluminescence (Université de Bordeaux). Les périodes froides assurées et probables, définies sur la figure 1, courbe a, sont reportées et corrigées en âge calendrier sur le tableau I. Lorsqu'on compare ces dates corrigées à celles de DANSGAARD et al. (1973), on s'aperçoit que les résultats sont excellents.
- Onze périodes sur douze coïncident de façon exacte.
- La période froide 2600 de la courbe a est proche d'une période froide de DANSGAARD.
- La période froide 6600-6900 AP (troncs aux alentours de 6000 C_{14}) doit se séparer en deux phases froides, 6600 et 6900 AP.
- Les troncs de la période 5200 C_{14} peuvent subir une correction de 700 à 1000 ans (rebroussement de la courbe SUESS), 1000 ans semblent correct et coïncident avec une période froide de DANSGAARD à 6200 AP.
- Le tronc F 7000 C_{14} , unique, peu significatif, après corrections, coïncide exactement à 7800, période froide de DANSGAARD.
- Sur courbe e, il existe deux crues glaciaires entre 5000 et 6000 AP, pour des températures moyennes élevées (influence des analyses O_{18} ?).
- Sept fois sur dix, lors de périodes froides, il y a des perturbations dans les concentrations de O_{18} qui correspondent à des points de rebroussement sur la courbe de SUESS (fig. 2).

- Si on compare les tendances des températures du Groenland (Camp Century) et celles de l'Antarctique (Byrd), on s'aperçoit que le Pôle sud s'est réchauffé de 6000 à 1000 AP, tandis que pour la même période, le Groenland s'est refroidi (Université Columbus, Ohio, 1973). Ceci pourrait expliquer les divergences des tendances entre les courbes c et d.

Incertitudes et erreurs

- Difficultés des analyses de O_{18} .
- Influence de l'altitude des précipitations sur les températures.
- Détermination exacte de l'âge des glaces par des calculs théoriques d'écoulement.
- L'influence du climat spécifique.

VII. CONCLUSION

Ces recherches et comparaisons avec d'autres méthodes mettent en évidence:

- La fréquence élevée d'oscillations du climat, au minimum une par millénaire, avec des périodes froides successives, qui peuvent être très proches. Trois périodes fraîches entre 3500 et 2500 AP, puis lors de ce dernier millénaire.
- Les différents résultats, C_{14} corrigés (courbe a et b), concordent avec 85 % des dates, périodes froides définies par DANSGAARD (courbe e).
- Malgré toutes les imprécisions qui existent, il s'avère que les résultats sont très positifs et démontrent la validité des trois méthodes: troncs fossiles morainiques, terres végétales en strates dans moraines et dates et températures des glaces du Groenland.
- Les périodes froides sont synchrones en Europe et au Groenland.
- Les méthodes de recherche du climat par les variations des niveaux ou des températures des mers, s'avèrent discordantes et présentent des imprécisions de dates.
- Les erreurs qui proviennent des méthodes de datations ou des temps de réponse des phénomènes aux variations climatiques sont d'un ordre de grandeur semblable. Si les résultats concordent ou sont synchronisés à ± 100 -200 ans, on peut être sûr qu'à ces époques, il s'est produit un changement de climat.

- D'autres examens synchrones particuliers ou isolés ont été étudiés et les coïncidences sont excellentes avec les différentes méthodes, par exemple:

Climats palynologiques dans les lacs alpins, par MARKGRAF et WELTEN (1968). Températures sur 3000 ans en Chine (Revue La Chine Aujourd'hui). Occupations des sites Eskimos en Alaska depuis 10 000 ans par GIDDING (1973).

Les dates d'occupations sont presque toujours situées à des périodes chaudes, par exemple: 8000, 5500, 5000, 3600, 2400, 1800.

- Pour des études futures, il sera intéressant d'obtenir la courbe dendrochronologique continue de 8000 AP à nos jours sur des mélèzes et aroles, comme FRITT (19) l'a fait aux USA sur des arbres du désert. Actuellement en Suisse, des travaux sont en cours à l'Université de Zurich et à l'Institut fédéral de recherches forestières de Birmensdorf (Dr SCHWEINGRUBER et F. RÖTHLISBERG).
- Les précipitations, paramètre peu connu, mais très important pour déterminer le climat (relation température - précipitation ?), pourraient être étudiées à partir des stalactites dans les grottes d'Europe. A ce sujet, le professeur BÖGGLI a déterminé les précipitations du Daun à nos jours par mesure de la dissolution du calcaire sur une dalle protégée partiellement par un bloc erratique en roche métamorphique. Sur 10 000 ans, il semble que les précipitations ont été ce qu'elles sont actuellement.
- Afin de pouvoir déterminer quels sont les facteurs géophysiques qui influencent le climat, il doit être fructueux de comparer les résultats obtenus avec les variations des taches solaires, les variations des pôles et du champ magnétique terrestre, etc.

Au terme de cette étude passionnante, on se rend compte que plus on connaît notre passé climatique, plus on pourra trouver les différentes causes des variations climatiques.

Bibliographie

- BOGLI, A. 1970. *Kalkabtrag in der Nördlichen Kalkalpen*, in Actes du 4e Congrès National de spéléologie, Neuchâtel. Supplément no 6 à Stalactite: 84-87.
- BEZINGE, A. 1971. *Déglaciation dans les Vals de Zermatt et d'Hérens de 1930 à 1970*. Communication à la S.H.F. Grande Dixence S.A. 36 pp.
- BEZINGE, A. et G. BONVIN. 1974. *Image du climat sur les Alpes*. Bull. Murithienne 91:27-48.
- BEZINGE, A. et R. VIVIAN. 1974. *Troncs fossiles morainiques et climat de la période holocène en Europe*. Communication à la S.H.F. 26 pp.
- BREHME, K. 1951. *Jahrringchronologische und -klimatologische Untersuchungen an Hochgebirgslärchen des Berchtesgadener Landes*. In Zeitschrift für Weltforstwirtschaft 14: 65-80.
- DANSGAARD, W. S.-J. JOHNSEN, H.-B. CLAUSEN et N. GUNDESTRUP. 1973. *Stable isotope glaciology*. Meddelelser om Groenland 197 (2): 53 pp. Kopenhagen.
- DENTON et PORTER. 1970. *Neoglaciation*. Scientific American, juin 1970.
- FLOHN, H. 1968. *Le temps et le climat*. Hachette, Paris. 253 pp.
- 1973. *Globale Energiebilanz und Klimaschwankungen*. Sonderheft. Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften 234.
- FLORENCE, J. 1970. *Dendroclimatologie en Maurienne (Savoie)*. Oecol. Plant., Gauthier-Villars 5: 365-393.
- FRITT, H.C. 1965. *Tree-ring évidence for climatic changes in western North America*. Monthly Weather Review 93 (7): 421-443.
- FURRER, G., F. BACHMANN et P. FITZE. 1971. *Erdströme als Formelement von Solifluktiondecken im Raume Munt Chavagl/Munt Buffalora (Schweiz. Nat.-Park)*. Résultats des recherches scientifiques entreprises au Parc National suisse 11 (65): 83 pp.
- FURRER, G. et P. FITZE. 1971. *Die Höhenlage von Solifluktionformen und der Schneegrenze in Graubünden*. Geographika Helvetica 26 (3):
- GERSTER, G. 1972. *Possibilités et limites de la dendrochronologie*. Documentation médicale Roche.
- GEYH, M.-A. 1971. *Die Anwendung der ¹⁴C-Methode*. Clausthaler Tekton. Hfte 11. Verlag Ellen Pilger. 108 pp.
- GIDDINGS, . 1973. *10 000 ans d'histoire arctique*. Fayard, Paris.
- KAISER, P. 1975. *Le retour des glaciers*. Fayard, Paris.
- LLIBOUTRY, L. 1964-65. *Traité de glaciologie*. Tome I et II. Masson, Paris.
- LORIUS, C. 1973. *Les calottes glaciaires, témoins de l'environnement*. La Recherche 34: mai 1973.
- MARKGRAF et WELTEN. 1968. *Mookundliche und vegetationsgeschichtliche Untersuchungen an einem Moorsee an der Weldgrenze im Wallis*. Dissertation, Université de Berne. 63 pp.
- MARTIN, P. de. 1974. *Analyse des cernes: dendrochronologie*. Masson, Paris. 78 pp.
- OLIVE, P. 1972. *La région du Léman depuis 15 000 ans. Données paléoclimatologiques et préhistoriques*. Revue de géographie physique et de géologie dynamique XIV (3):

- PATZELT, G. 1973. *Die Postglazialen Gletscher und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen)*; mit sechs Pollendiagrammen von S. BORTENSCHLAGER. Zeitschr. f. Geomorphologie. Suppl. Band 16: 25-72.
- POLGE, H. 1971. *Le message des arbres*. La Recherche 11: varil 1971.
- ROTHLISBERGER, F. 1973. *Blümlisalpseen und Gletscherpässe im Raume Zermatt-Ferpècle-Arolla. Ein Beitrag zu Klimaschwankungen im Postglacial mit einem Anhang über Holzfunde aus Gletschern*. Diplom. Geograph. Inst. Uni. Zürich. 300 pp.
- ROTHLISBERGER, F. et al. 1974. *Datations des moraines d'après des sols fossiles: Glaciers de Findelen*. In: *Les variations climatiques postglaciaires dans les Alpes*. Congr. Int. Glac. Soc. Courmayeur. Zürich: 12-14.
- SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE, 1974. *Influence des activités de l'homme sur le cycle hydrométéorologique*. XIIIe journée de l'hydraulique. Paris.
- SUESS, 1969. *The three causes of the secular-carbon-14 fluctuations*. Radiocarbon Variations and Absolute Chronology Symposium. Uppsala.
- THENIUS, E. 1974. *Eiszeit, einst und jetzt*, Kosmos. Stuttgart.
- TERS, M. 1973. *Les variations du niveau marin depuis 10 000 ans, le long du littoral atlantique français*. 9e Congr. Int. de l'INQUA. Christ Church.
- VENETZ, I. 1861. *Mémoire sur l'extension des anciens glaciers renfermant quelques explications sur leurs effets remarquables*. Nouv. Mém. Soc. helv. Sc. nat. 18.
- VIVIAN, R. 1973. *La chronologie postwürmienne à travers l'étude des délaissés glaciaires*. Inst. Géogr. Alpine. Grenoble.
- 1975. *Les glaciers des Alpes occidentales*. Thèse. Allier, Grenoble. 513 pp.
- WOLLIN, G., ERICSON et J. WOLLIN. 1973. *Geomagnetic variations and climatic changes two millions*.
- ZOLLER, H., C. SCHINDLER et H. ROTHLISBERGER. 1966. *Postglaziale Gletscherstände und Klimaschwankungen im Gotthardmassiv und Vorder-rheingebiet*. Sonderabdruck aus Verhandl. Naturf. Ges. Basel 77: 97-164.